



TITLE:

# 粒子法に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

桐山, 貴俊

---

CITATION:

桐山, 貴俊. 粒子法に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用. 京都大学, 2018, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2018-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13210>

RIGHT:

|   |                        |    |       |
|---|------------------------|----|-------|
| 京都大学  | 博士（工学）                 | 氏名 | 桐山 貴俊 |
| 論文題目  | 粒子法に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用 |    |       |
| <p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、地盤の変形予測技術に関して、特に大変形領域に対する予測技術の開発および実問題への応用をまとめた内容であり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、これまでの地盤工学分野における解析技術およびその用法の説明からはじまり、近年高度化してきた有限要素法、個別要素法、また、本論文での主題である粒子法について手法の成立、各種法の利点、問題点を整理している。著者は研究目的として、大変形下における地盤材料の変形挙動を明らかにすること、および、その予測手法を確立すること、を掲げており、その研究目的は、社会的、技術的課題を解決する手段であると位置づけている。特に数値解析手法に基づく予測手法はPCの高性能化と共に設計行為として組み込まれる見通しであり、予測法が確立することに対する実務上の期待は大きい。本論文は連続体力学に基づく粒子法とりわけMaterial Point Method (MPM) に着目し、その手法を拡張し、新たに任意形状の支配領域を有する領域積分法 (Arbitrary Particle Domain Interpolation 法：APDI 法) を提案する旨を説明している。</p> <p>第2章では、本研究で着目した粒子法の定式化を示し、本論文で採用する構成モデルと合わせて、理論的な背景を整理している。また、MPM に基づく支配方程式の離散化および離散化に用いる種々の補間関数について整理し、それらの計算精度について報告している。本章では、はじめにオリジナル MPM の定式化を Sulsky らが示した原論文を引用し示している。MPM は、粒子と計算格子を基本構成であり、補間関数を用いて両者を関連させる手法であることを説明している。次にオリジナル MPM に数値振動が生じる数学的不具合を指摘し、その数値振動を解消する手段として粒子の支配領域を定義する Generalized Interpolated Material Point (GIMP) 法が提案されていること、また、MPM の数値計算法としての根幹が粒子と計算格子を関連づける補間関数にあることを指摘している。この補間関数の定義によりオリジナル MPM は粒子の支配領域を、①軸変形を考慮する手法、②せん断変形まで考慮する方法、③任意形状の変形を考慮する方法、と段階を経て発展してきたことを示している。オリジナル MPM に加えて、新たに提案された各種補間関数の導出および定式化をまとめて示している。</p> <p>第3章では、構築された数値計算法の地盤材料への適用例を示している。二次元および三次元条件において、三軸圧縮試験の再現解析を実施し、キャップの境界条件がせん断帯の形成に影響することを示している。続いて実施した、浅い基礎の支持力問題では、実フィールドレベルの問題に対しても連続体に基づく粒子法が適用できることを示している。本章では、まず微小変形問題において粒子法から得られた解析結果および格子法（有限差分法）から得られた解析結果が一致することが示され、同一の解析条件であれば本論文で提案する粒子法が既往の格子法と同等の計算精度があることを明らかにしている。微小変形問題においては、その極限支持力が剛塑性破壊モードを仮定した Prandtl 解と一致することを示し、直接法と整合する結果が得られることを同時に示している。次に大変形解析結果が示され、大変形下においては理論解より高い支持力となることが示された。さらに、異なる補間方法による比較解析を実施</p> |                        |    |       |

|  |        |    |       |
|--|--------|----|-------|
| 京都大学   | 博士（工学） | 氏名 | 桐山 貴俊 |
| <p>し、浅い基礎の支持力問題において、荷重～沈下関係と地盤変形にどのような差異があるか検討している。その結果、uGIMP 法、cpGIMP 法はより離散的な挙動を示し、CPDI 法、APDI 法はより連続的な挙動を示すとしている。対象とする材料の離散的、連続的な挙動を見極め、これら手法を切り替えて利用することが適当であると結論づけている。最後の例題として改めて三軸圧縮試験の再現解析を APDI 法を用いて実施し、本論文で示す新たな提案手法が、形状の再現性が高いこと、変形の連続性が高いこと、有限要素法など格子法に比べて高い変形性能を有していることを示している。</p> <p>第 4 章では、実用的に大規模解析を実施するために、新たに提案する粒子・要素混合法について報告している。第 3 章で扱った浅い基礎の支持力問題を用いた精度検証を実施後、三次元問題への拡張性について検討している。粒子・要素混合法は、本論文で一貫して主張している粒子法およびその補間関数に対して、粒子毎に補間関数を切り替えることで実現した計算法である。より大きな変形が期待できる領域に変形性能に優れる粒子性の強い補間関数（uGIMP 法、cpGIMP 法）を与えた粒子を、変形が微少な領域にとどまることが期待される領域には連続性に優れた補間関数（APDI 法）を与えた粒子を、それぞれ配置することで、計算負荷を軽減し、かつ、三次元問題も実施可能な計算法を提案している。粒子・要素混合法の適用性を確認する目的で、浅い基礎の支持力問題を用いて、モデル化の検討結果を示している。検討結果によれば、基礎が貫入する方向に粒子を配置したモデルであれば、混合モデルとして適切な解が得られ、全て粒子でモデル化した場合と同等の解となることが示された。二次元解析結果を受けて、三次元問題への手法の適用性を示すため、三次元空間に拡張した浅い基礎の支持力解析を実施し、その結果を報告している。三次元解析における応力～ひずみ関係は基礎に対して抵抗する地盤の割合が多いため、二次元解析結果に比べて変形が小さく算出されること、基礎下に形成される押し込み楔、変形の集中箇所は二次元解析結果と同様の結果が三次元解析でも得られることを提示し、提案手法の三次元問題への適用性を示した。</p> <p>第 5 章では、多相系理論への展開を示す目的で、まず二相系理論に基づく定式化および MPM に基づく離散化を示している。直接法による理論解（Terzarghi の 1 次元圧密理論、Simon の 1 次元過渡応答）を用いて定式化、離散化を検証している。提案する定式化と離散化による解析結果が、Terzarghi 理論における水圧分布、圧密度、と一致し、また、固相の変位および液相の固相に対する相対変位の時刻歴もまた、Simon による直接解と一致することを示し検証としている。本論では、次に提案手法の妥当性確認方法として、遠心載荷装置を用いた模型実験を通して観測した液状化地盤の応答結果との比較を示している。遠心載荷装置を用いた模型実験実施にあたり、実験装置、地盤材料、実験手順を詳細に示した上、地盤材料の各種要素試験結果（三軸試験、粒度試験、透水試験など）を示している。要素試験結果からは、数値解析に用いるパラメータを決定し、模型地盤の解析モデルの構築、各種解析条件（荷重条件、境界条件）を用いて模型実験の再現解析を実施している。本論では、過剰間隙水圧の上昇および消散過程を再現することに着目しており、解析および実験から得られた過剰間隙水圧を時刻歴で比較し、上昇および消散過程が両方で良く一致していることを示し妥当性確認としている。</p> <p>第 6 章では、本研究の結論と今後の課題をまとめている。</p> |        |    |       |

(論文審査の結果の要旨)

地盤材料の大変形を合理的にシミュレーションするための新たな解析手法を提案するだけでなく実問題への適用方法を具体的に示すことによって、地盤工学の実務における設計計算や性能評価計算を高度化した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 粒子法的一种である Material Point Method (MPM)の新たな空間補完法を新たに提案し、任意形状の粒子支配領域を定義可能とした。さらに、提案手法による地盤材料の三次元変形解析結果は実験結果を良く再現しており、地盤材料の破壊および破壊後の大変形解析への適用を実現した。
2. 連続体的大変形の解析に適した提案補間法と不連続的大変形の解析に適した既存の補間法のお互いの長所のみを活用する、新たなハイブリッド型の地盤大変形解析手法を提案した。これにより、粒子法が苦手としていた境界値を評価しつつ、格子法では表現が困難な大変形までを合理的に解析することができる。二次元、三次元支持力問題を解析し、実問題への高い適用性を示した。
3. 地盤材料の変形問題の解析に必須である間隙水の挙動と土骨格の変形の相互作用を考慮した、固液二相連成 MPM を確立し、より広範な地盤工学の大変形問題の解析が可能な手法へと拡張した。加振によって発生する液状化に伴う地盤内の間隙水圧の挙動を精度よく解析可能であることを示した。

本論文は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年8月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。